Anàlisi de la intrusió marina derivada de l'extracció d'aigua per a l'abastament urbà a Ciutadella (Menorca, Illes Balears, Mediterrània Occidental)

Agustí RODRÍGUEZ-FLORIT, Anna MENCIÓ i David BRUSI

SHNB

SOCIETAT D'HISTÒRIA NATURAL DE LES BALEARS

Rodríguez-Florit, A., Menció, A. i Brusi, D. 2012. Anàlisi de la intrusió marina derivada de l'extracció d'aigua per a l'abastament urbà a Ciutadella (Menorca, Illes Balears, Mediterrània Occidental). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 55: 123-138. ISSN 0212-260X. Palma de Mallorca.

La Unitat Hidrogeològica Migjorn està constituïda per una plataforma carbonatada del Miocè Superior i representa la principal font de recursos hídrics de l'illa de Menorca. Aquesta unitat està afectada per un procés d'intrusió marina generalitzat tot i que es manifesta especialment en la seva part occidental. El present estudi, que integra tècniques de Tomografia Elèctrica (ERT) amb l'anàlisi de les dades hidroquímiques dels pous d'abastament urbà i de testificació dels sondejos d'aquests pous, permet realitzar noves aportacions al coneixement d'aquesta problemàtica hidrogeològica al municipi de Ciutadella de Menorca. L'anàlisi de les fàcies hidroquímiques i la seva evolució temporal indiquen que totes les mostres presenten fàcies clorurades sense excepció, però amb un repartiment molt desigual de les concentracions de l'ió clorur. Aquesta distribució és justificada per la presència d'estructures de col·lapse i carstificacions, detectades mitjançant Tomografia Elèctrica, així com per la variabilitat textural dels materials des dels quals es produeix el bombament
Paraules clau: *Intrusió marina, Recursos hídrics, Carst, Tomografia Elèctrica.*

ANALYSIS OF SEAWATER INTRUSION RESULTING FROM THE EXTRACTION OF URBAN WATER SUPPLY IN CIUTADELLA (MENORCA, BALEARIC ISLANDS, WESTERN MEDITERRANEAN). The Hydrogeological Unit Migjorn is composed of an Upper Miocene carbonate platform and represents the main water resource in the island of Menorca. This unit is affected by general seawater intrusion process preferably in the west. This study, integrating techniques of Electrical Resistivity Tomography (ERT) with hydrochemical data analysis from wells of urban water supply and correlation of borehole logs of these wells, allows new contributions to the knowledge of the hydrogeological problem in the town of Ciutadella de Menorca. Analysis of hydrochemical facies and its temporal evolution indicate all samples show chloride facies without exception, but with a very different distribution of chloride ion concentrations. This distribution is justified by the presence of collapse structures and karstifications detected by Electrical Resistivity Tomography, as well as textural variability of materials where the pumping occurs
Key words: *Seawater Intrusion, Water resources, Karst, Electrical Tomography.*

Agustí RODRÍGUEZ-FLORIT; Geoservei Balears Projectes i Gestió Ambiental, Himàlaia, 37, 07703 Maó (adreça contacte: a.rodriguez@geoservei.com). Anna MENCIÓ i David BRUSI; Centre de Recerca en Geologia i Cartografia Ambiental (Geocamb), Departament de Ciències Ambientals, Universitat de Girona. Campus de Montilivi 17071 Girona.

Recepció del manuscrit: 4-dec-12; revisió acceptada: 30-des-12

Introducció

A l'illa de Menorca es diferencien tres unitats hidrogeològiques (DGOH (1989) i actualitzat per la DGRH (1998)): Migjorn (19.01), Albaida (19.02) i Fornells (19.03). La Unitat Hidrogeològica Migjorn (U.H. Migjorn) és amb 386,17 km^2 d'àrea permeable (Giménez *et al.*, 2004), la més extensa i representa la principal font de recursos hídrics de l'illa. Aquesta unitat es caracteritza per la presència d'una gran concentració de pous, molt d'ells amb una intensa taxa de bombament, associada als "pics" de demanda derivats de l'alta ocupació turística que, des dels anys 80, augmenta estacionalment les extraccions dels aqüífers. Segons el Pla Hidrològic de les Illes Balears (DGRH, 2011) el consum per a l'abastament urbà s'estableix en 11 hm^3/any el que representa un 15,9% de la infiltració anual total que és dóna a l'aqüífer. A aquest fet, cal afegir les necessitats hídriques d'una emergent agricultura, que tot i que en les darreres dècades es troba en ple retrocés per l'abandonament de finques agràries, ha anat evolucionant cap a una agricultura intensiva que al llarg dels darrers anys ha incrementat la superfície de regadius. Segons DGRH (2011), s'estima el consum hídric d'aquests regadius en 10 hm^3/any, un 14,5% de la infiltració anual total. Cal considerar que el 68,4% de l'aigua infiltrada en un any és descarregada de forma natural al mar.

Aquesta elevada pressió sobre la U. H. Migjorn s'ha traduït en una notable disminució de la qualitat hidroquímica de les aigües subterrànies, preferentment en els sectors oriental i occidental, on es troben els principals nuclis urbans de l'illa. Tot i que la problemàtica associada a la intrusió marina és present a la part de llevant, especialment a les costes dels municipis d'Es Castell i Sant Lluís, el sector oriental de Menorca es caracteritza per un greu problema de contaminació per nitrats amb valors clarament superiors al màxim permès per les aigües de consum humà (50 mg NO_3^-/L, d'acord amb el RD 140/2003 (BOE, 2003)). En canvi, en el sector de ponent, el bombament intensiu ha desencadenat un procés d'intrusió marina que ha provocat una notable pèrdua de qualitat per salinització de l'aqüífer, especialment al nord-est del nucli urbà de Ciutadella, com a conseqüència de les extraccions per abastament urbà que es realitzen al paratge conegut com Es Caragolí.

Cal considerar que l'estudi del procés de la intrusió marina a les Illes Balears s'ha centrat especialment en treballs específics a l'illa de Mallorca (Barón i González (1978), Barón *et al*. (1984), Custodio *et al*. (1992), López-García i Mateos (2003a), Mateos i López (2003), López i Mateos (2006) i Mateos (2007)). En el cas de Menorca, la problemàtica ha estat abordada pel *Instituto Geológico y Minero de España* (IGME) i per la Direcció General de Recursos Hídrics del Govern Balear (DGRH), principalment mitjançant els informes de caràcter intern, on es recull i integra la informació obtinguda per les xarxes de control dels nivells piezomètrics i qualitat hidroquímica d'ambdós organismes a Menorca (IGME i DGRH, 2001, 2004 i 2006). Entre les publicacions existents que caracteritzen la intrusió marina a Menorca, es troben els treballs de López-García i Mateos (2003b) i Giménez *et al.* (2004).

El principal objectiu d'aquesta contribució és presentar els resultats de la diagnosi sobre la problemàtica hidrogeològica derivada de la intensa extracció d'aigua que durant els darrers 35 anys s'ha produït a Ciutadella a la zona d'Es Caragolí. Aquestes noves dades permeten millorar el coneixement del medi físic de la

zona, millora necessària per comprendre els processos hidrogeològics que s'hi desenvolupen.

Enquadrament geològic

En termes generals, la regió de Migjorn de Menorca està constituïda per calcàries i calcarenites del Miocè Superior. Tot i així, les fàcies presents en aquest sector mostren una important variabilitat textural. Així les coses, a partir de la subdivisió estratigràfica del Miocè menorquí realitzada inicialment per Obrador (1970) i Obrador *et al*. (1983) i actualitzada per Pomar *et al.* (2002) i Obrador i Pomar (2004), poden diferenciar-se dues unitats principals. Per una banda la Unitat Inferior de Barres (UIB), corresponent a la Unitat intermèdia i part de la Superior de Rosell i Llompart (1983) i on inclouen la major part del Miocè i per l'altra la Unitat d'Esculls (UE) equivalent, en part, a la Unitat Superior definida per Rosell i Llompart (1983). Pomar *et al.* (2002) i Obrador i Pomar (2004) diferencien una tercera Unitat Basal Conglomeràtica (UBC) (part de la Unitat inferior de Rosell i Llompart (1983) anomenada posteriorment Unitat de Conglomerats Basals (Rosell i Llompart, 2002) corresponent als primers sediments del Neogen a Menorca majoritàriament del Miocè inferior/mitjà. Segons Pomar *et al.* (2002) i Obrador i Pomar (2004), litològicament la UIB mostra una alternança de calcarenites i calcàries detrítiques llimoses amb una gran variabilitat textural amb *packstones* i *grainstones* dominants i dipositades en un ambient de rampa progradant. La UE disposada en un ambient de plataforma escullosa amb abundants cossos bioconstruïts i sempre per sobre de l'anterior, presenta unes característiques litològiques molt similars a la UIB però amb un major predomini calcarenític. D'aspecte en general més massiu, aquestes fàcies són força diverses ja que depenen del subambient deposicional. La tercera unitat (UBC) està constituïda bàsicament per conglomerats. A la zona de Ciutadella aquestes fàcies estan formades per còdols i blocs dolomítics procedents del sòcol i s'interpreten com a dipòsits d'ambient litoral o de peu de penya-segats.

El sòcol mesozoic de la zona d'estudi està integrat fonamentalment per dolomies i calcàries del Juràssic que també s'inclouen en la U.H. Migjorn. Aquest aflora a l'extrem occidental del municipi (Pont d'en Gil, Bajolí i Punta Nati), al nord a la zona de "Curniola" i extensament a "Son Planes" des de Biniatramp a prop de Cala Morell fins a la carretera general Me-1.

Material i Mètodes

La metodologia utilitzada s'ha estructurat en tres fases de treball correlatives en el temps, on la integració de tècniques de prospecció geofísica, de correlació amb testimonis de sondatges i d'anàlisi de dades hidroquímiques i piezomètriques de les aigües subterrànies, permeten realitzar una correcta diagnosi de la problemàtica que representa la intrusió marina en aqüífers costaners, tal i com es descriu a Mas-Pla *et al.* (2012).

L'anàlisi hidroquímica i piezomètrica s'ha realitzat mitjançant les dades recollides per les xarxes de control de la DGRH al llarg dels darrers 12 anys i han estat facilitades per aquesta institució per a aquest treball. D'aquesta manera, s'ha pogut determinar l'estat i l'evolució hidroquímica de les aigües subterrànies en la zona d'estudi. Mitjançant les analítiques de les mostres de 10 pous inclosos en l'àmbit d'estudi (Fig. 1), s'ha realitzat la caracterització hidroquímica de la zona

d'estudi mitjançant diagrames de Piper a partir de les concentracions de cations (Ca^{2+}, Mg^{2+} i Na^{+}) i anions majoritaris (HCO_3^{-}, SO_4^{2-} i Cl^{-}). Aquestes dades corresponen al període comprés entre setembre de 1997 i juliol de 2009. De la mateixa manera, s'han tingut en compte les evolucions de les concen-tracions de clorurs a partir de les analítiques cedides per la DGRH i el servei d'aigües de l'Ajuntament de Ciutadella en un període comprès entre el 1997 i el 2010.

Pel que fa als nivells hidràulics, s'ha treballat principalment mitjançant les dades dels piezòmetres que la DGRH controla als pous Caragolí 4, 5, 8 i Ses Arenes, pel mateix període de temps.

Complementàriament, s'ha dut a terme una campanya de prospecció geofísica mitjançant el mètode de Resistivitats per Tomografia Elèctrica (ERT) que ha permès caracteritzar geoelèctricament el subsòl de Es Caragolí i detectar anomalies associades al procés d'intrusió marina, així com zones anòmales relacionades amb cavitats i conductes càrstics. S'han pres 13.000 mesures de resistivitat registrades en 12 perfils bidimensionals de Tomografia Elèctrica al llarg del camp de bombament d'Es Caragolí. En aquest treball es mostren els tres perfils més representatius (Fig. 1).

El mètode elèctric de prospecció geofísica, basat en l'estudi de resistivitats, és un dels més utilitzats en el camp de la geofísica moderna i es fonamenta en l'anàlisi de la resistència que oposen els cossos geològics al pas d'un corrent elèctric continu introduït al terreny mitjançant elèctrodes disposats en línia recta i separats per una mateixa distància. En el mètode clàssic de prospecció elèctrica per a cada mesura de resistivitat s'utilitzen quatre

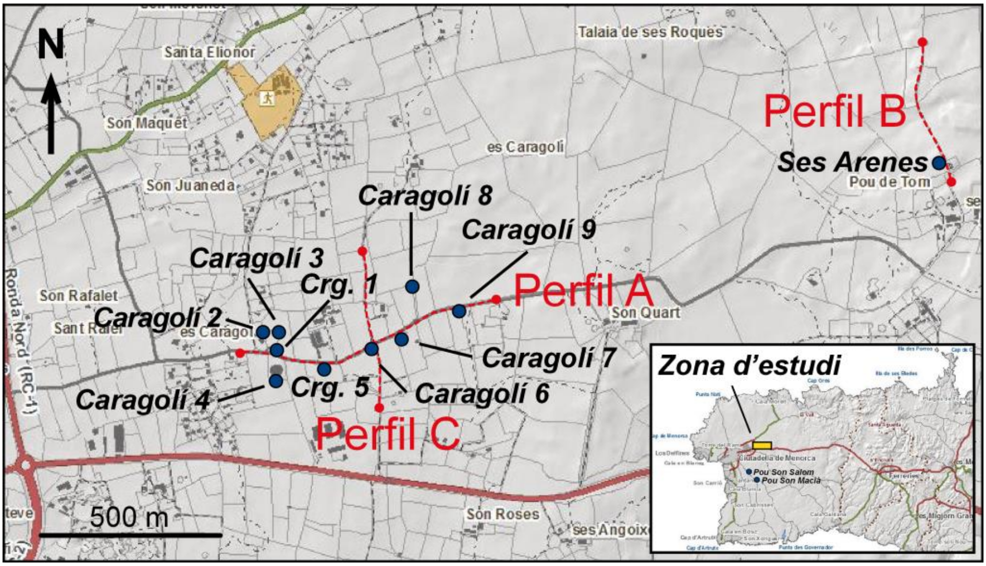


Fig. 1. Zona d'estudi: Camp de bombament de Es Cargolí. Situació dels pous per a l'abastament urbà de Ciutadella i traçat dels perfils de Tomografia Elèctrica.

Fig. 1. *Study area: Es Caragolí pumping field. Location of the wells of urban water supply of Ciutadella and draw of Electrical Tomography profiles.*

model bidimensional utilitzat pel programa B) que es troben connectats a una font d'energia d'intensitat coneguda, s'introdueix en el terreny un corrent continu, i mitjançant els altres dos (M i N) es mesura la diferència de potencial. Amb aquestes dues mesures (intensitat i diferència de potencial) s'obté la resistivitat aparent del material afectat pel corrent elèctric en diferents punts del subsòl. Per optimitzar l'adquisició de dades, amb la tècnica d'ERT les mesures es realitzen utilitzant un gran nombre d'elèctrodes fixes (61 en aquest treball) connectats a un cable multinucli. Un ordinador portàtil juntament amb un connector electrònic seleccionen automàticament els quatre elèctrodes AB-MN corresponents per a cada mesura (Griffith *et al*., 1990).

La separació entre elèctrodes condiciona, en funció del problema plantejat, el grau de resolució i la profunditat d'investigació, de tal manera que a menor separació major resolució i a major separació major profunditat. Això fa que el rang d'estudi pugui variar des de pocs a centenars de metres de profunditat. Amb l'equip *ABEM SAS1000 Terrameter and Lund electrode selector system* (ABEM Instrument AB, Estocolm, Suècia) utilitzat per aquest estudi, s'ha treballat amb una separació electròdica de 5 m, amb la qual s'ha assolit una profunditat d'investigació d'entre 70 i 75 m.

El diferent comportament geoelèctric del medi, permet obtenir seccions bidimensionals o pseudoseccions de resistivitats aparents del terreny. Les mesures de resistivitat recollides amb un equip d'ERT són tractades posteriorment mitjançant algoritmes d'inversió amb el *software* RES2DINV (Geotomo Software, Gelugor, Malàisia) desenvolupat per Loke i Barker (1996) i Loke *et al.* (2003), el qual determina automàticament i en pocs minuts, un model bidimensional de resistivitats reals del subsòl a partir del conjunt de dades que constitueixen la pseudosecció de resistivitats aparents mesurades al camp. El model bidimensional utilitzat pel programa consisteix en un conjunt de blocs rectan-

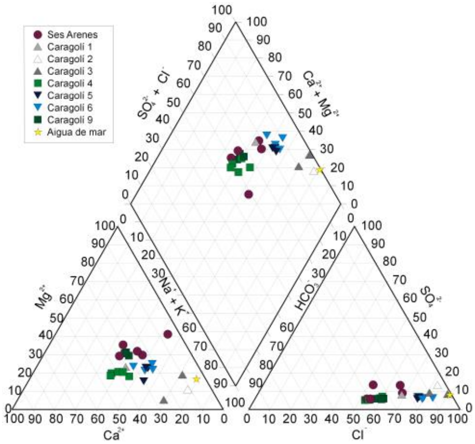


Fig. 2. Diagrames de Piper-Hill del conjunt de mostres amb una anàlisi complerta. Mitjançant l'anàlisi dels cations poden diferenciar-se tres grups diferents. Un primer grup correspon a fàcies sódico-magnèsiques (Ses Arenes i Caragolí 9), el segon grup presenta fàcies sòdico-càlciques (Caragolí 4, 5 i 6) i el tercer (Caragolí 2 i 3) mostra fàcies sòdiques i indica que és el més afectat pel procés de mescla amb el mar. La composició hidroquímica de l'aigua de mar ha estat establerta mitjançant una mostra corresponent a la Costa Daurada (Kruse i Mas-Pla, 2009).

Fig. 2. *Piper-Hill diagrams of the whole of samples with a complete analysis. Analysis of cations allows differentiating three different groups. The first one corresponds to sodium-magnesium facies (Ses Arenes and Caragolí 9), the second group presents sodium-calcium facies (Caragolí 4, 5 and 6) and the third group (Caragolí 2 and 3) shows sodium facies, indicating this group is the most affected by the process of mixing with the sea. The hydrochemical composition of seawater has been established by a sample corresponding to the Costa Daurada (Kruse and Mas-Pla, 2009).*

gulars distribuïts segons els punts de mesura de la pseudosecció.

Per a realitzar el càlcul dels valors de resistivitat s'utilitza una subrutina de modelització directa, així com una tècnica d'optimització no lineal de mínims quadrats per a la rutina d'inversió (deGroot-Hedlin i Constable, 1990; Sasaki, 1992 i Loke i Barker, 1996). Durant el procés d'inversió, es produeixen successives comparacions entre les dades mesurades al camp i la resposta del model, que es va actualitzant en cada iteració. Si la comparació és bona es deté el procés d'iteració, si l'ajust no és bo, el procés continua fins que s'arriba a la convergència. La comparació entre els valors mesurats i els obtinguts en el model d'inversió són indicatius de l'error d'ajust del model.

La interpretació de les dades geofísiques s'ha recolzat amb la compa-ració dels models obtinguts amb columnes reals procedents de sondatges de reco-neixement existents a la zona d'estudi. D'aquesta manera, s'ha procedit al reconeixement i testificació de diversos sondejos per a complementar i corroborar les dades obtingudes mitjançant les tècniques geofísiques.

Aquests sondejos foren perforats per a la instal·lació de la Xarxa de piezòmetres de la DGRH a Menorca, cedits a l'Institut Menorquí d'Estudis (IME) l'any 2006 i emmagat-zemats a la Fortalesa de La Mola de Maó. Per aquesta part del treball s'ha realitzat una selecció d'11 sondejos dels 33 localitzats al municipi de Ciutadella, prioritzant l'estat de conservació la proximitat als perfils geofísics.

Resultats i discussió

Mitjançant les dades d'hidroquimisme de les quals es disposa de diverses anàlisis complertes en la major part dels pous estudiats, s'ha realitzat un diagrama de Piper (Fig. 2) per a la caracterització hidroquímica de la zona. D'aquesta manera, s'han utilitzat les dades de 8 dels 10 pous que constitueixen el camp de bombament per abastament urbà de Es Caragolí, així com de dos pous situats al sud del municipi (Son Salom i Son Macià). Per falta d'anàlisis complertes no s'han pogut utilitzar les dels pous Caragolí 7 i 8. La representació dels anions permet comprovar que totes les mostres considerades presenten fàcies clorurades sense excepcions i que per tant estan afectades per un procés d'intrusió marina.

L'anàlisi dels cations permet diferenciar tres grups de fàcies hidroquímiques. El primer grup està format per les mostres de Ses Arenes i Caragolí 9 i correspon a unes fàcies de tipus sòdico-magnèsiques, per tant, amb proporcions equivalents de sodi i magnesi, que indicarien un bombament d'aquests pous des de materials dolomítics. Les mostres dels pous Caragolí 4, 5, 6 i Son Macià presenten fàcies sòdico-càlciques i per aquest motiu i a diferència de les anteriors, estarien més influenciades per materials calcaris. Tot i així, les mostres dels pous Caragolí 4, 5 i 6 contenen fins a un 20% de magnesi i d'aquesta manera cal considerar l'efecte de la dissolució de carbonats amb un cert contingut en magnesi. Al pou de Son Macià, la proporció de magnesi és inferior i es considera una major presència de calcarenites cap al sud del municipi. El tercer grup considerat mostra fàcies de tipus sòdiques i està format pels pous Caragolí 2 i 3 i Son Salom, sent aquest darrer grup el més afectat pel procés de mescla amb l'aigua de mar.

La representació del conjunt de dades piezomètriques en condicions estàtiques (Fig. 3) permet observar un comportament

variable en funció del pou considerat. Cal destacar que tots els pous bomben per sota el nivell del mar. Des de la seva entrada en funcionament al 2001, el pou de Ses Arenes manté el seu nivell molt estable, a 4,6 m s.n.m. Per contra, al pou Caragolí 4 s'hi observa una tendència positiva del nivell de -5 m a 0,8 m. Els nivells d'aquest pou es mostren molt constants fins al primer semestre de 2003 on s'inicia una recuperació fins al 2007 on s'observa una estabilització a la cota esmentada, tot i que amb una lleugera tendència ascendent. Aquesta recuperació es relaciona amb la disminució del cabal bombejat per aquest pou, que es veu compensat pel volum d'aigua extret pels nous pous de Ses Arenes.

L'evolució del nivell hidràulic del pou Caragolí 5 es mostra molt variable com a conseqüència de l'efecte d'un pou molt pròxim, el Caragolí 6. Així, encara que durant la presa de mesures el pou Caragolí 5 no bomba, el seu nivell varia en funció de si ho fa el pou Caragolí 6. D'aquesta manera, quan el pou Caragolí 6 es troba en

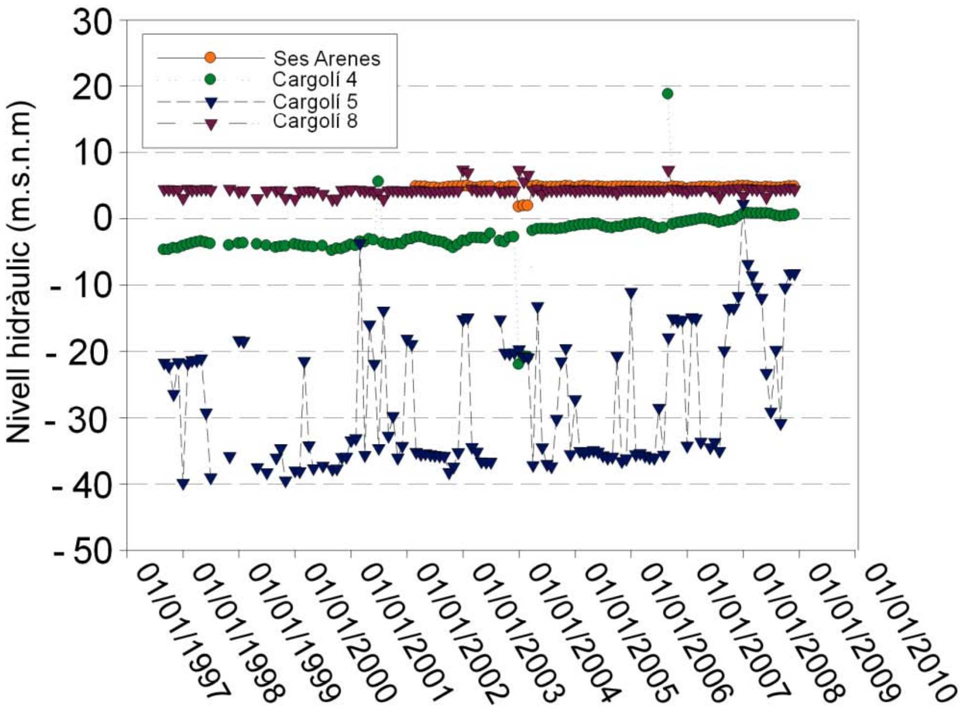


Fig. 3. Evolució dels nivells hidràulics en condicions estàtiques dels pous Ses Arenes, Caragolí 4, Caragolí 5 i Caragolí 8. Dades recollides per les xarxes de control de la Direcció General de Recursos Hídrics del Govern Balear.

Fig. 3. *Evolution of hydraulic levels under static conditions of wells Ses Arenes, Caragolí 4, Caragolí 5 and Caragolí 8. Data collected by the control networks of the Direcció General de Recursos Hídrics of the Govern Balear.*

funcionament els nivells del pou Caragolí 5 es situen entre -39 m i -33 m, mostrant una recuperació a partir de l'any 2001 coincidint també amb l'entrada en funcionament dels pous de Ses Arenes. El poc ús al que ha estat sotmès el pou Caragolí 8 als darrers 15 anys es manifesten amb una evolució del nivell molt constant a 4,3 m. El conjunt de nivells representats mostren que els del pou Caragolí 5 són els que es troben en pitjors condicions. Tanmateix, cal considerar que la proximitat a la que es troben els pous Caragolí 4, Caragolí 5 i Caragolí 8 faria esperar uns nivells hidràulics més similars entre sí dels que s'observen. Aquesta variació, considerablement significativa, cal associar-la a diferències de permeabilitat dels materials des de on es produeix el bombament.

La comparació dels nivells hidràulics i l'evolució temporal de la concentració de clorurs no evidencia que la disminució dels cabals extrets comporti una recuperació de la qualitat de l'aigua. Així, la relació entre el nivell del pou Caragolí 4 i l'evolució de l'ió clorur dels pous Caragolí 4 i 9 (Fig. 4A), revela que la recuperació del nivell hidràulic no ha representat una millora en la concentració de clorurs.

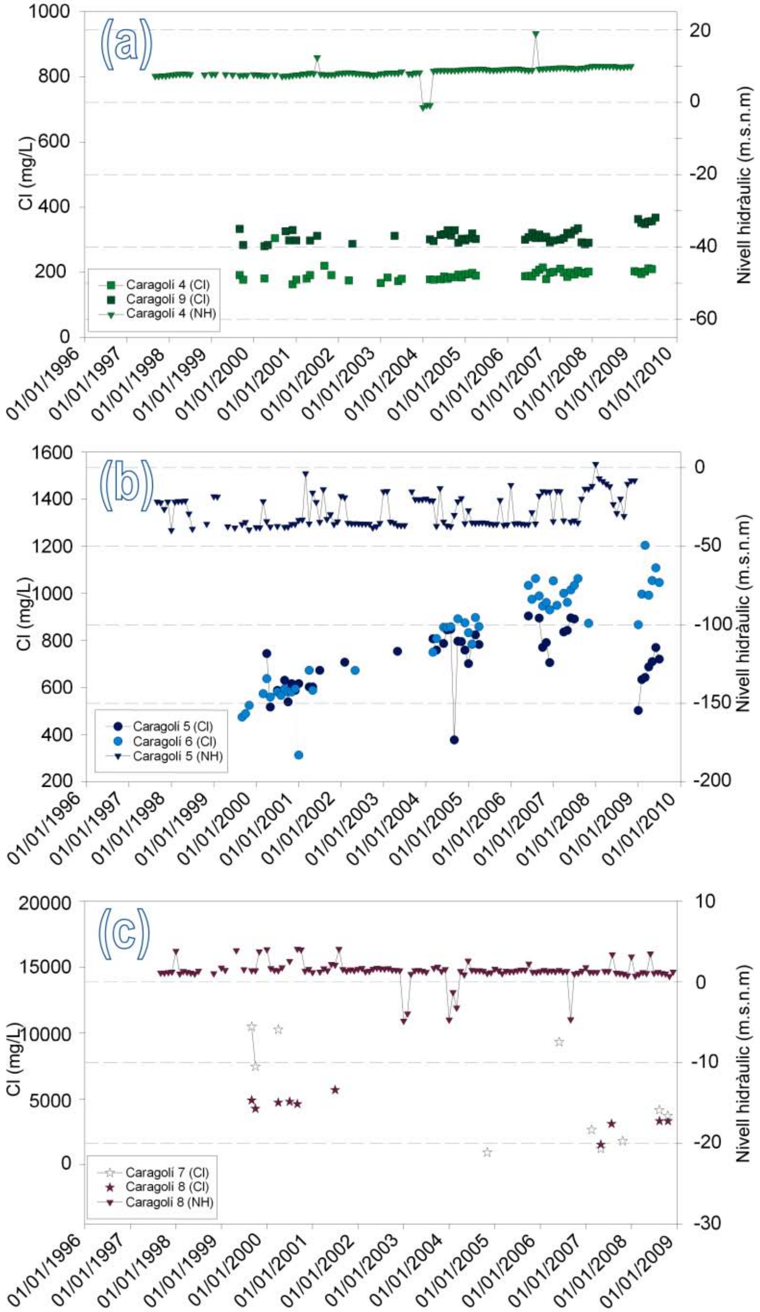
Per contra, s'observa un increment de clorurs que és significativament superior al comparar les evolucions dels anys 2007 i 2009/10. Aquestes s'han situat en màxims de 400 mg Cl^-/L, que suposen valors superiors al màxim permès per a les aigües de consum humà (250 mg Cl^-/L (BOE, 2003)). L'històric de dades dels pous Caragolí 5 i 6 (Fig. 4B) permeten confirmar la tendència descrita pels pous anteriors. La recuperació del nivell no es manifesta en una recuperació de la concentració de clorurs, ans al contrari, els clorurs s'han incrementat notablement i d'una manera progressiva durant els darrers 10 anys, especialment en el pou Caragolí 6 arribant als 1200 mg Cl^-/L.

Els pous Caragolí 7 i 8, actualment en desús, són els que presenten una pitjor qualitat hidroquímica. A la Fig. 4C es pot observar que durant el seu ús com a pous d'abastament es van arribar assolir concentracions màximes de 10.000 mg Cl^-/L i de 5.000 mg Cl^-/L respectivament. Actualment, amb bombaments molt puntuals, se situen properes als 3.000 mg Cl^-/L. Les variacions hidroquímiques d'aquests pous no s'han manifestat en el nivell hidràulic que s'ha mantingut constant.

Les diferències detectades en la distribució de l'ió clorur poden ser justificades mitjançant els perfils de Tomografia Elèctrica i la testificació dels sondejos adjacents als pous. En general, les diferents imatges d'ERT obtingudes, mostren una heterogeneïtat molt alta de

Fig. 4. Relació entre l'evolució de les concentracions de clorurs (1999 a 2010) i els nivells hidràulics (1997 a 2009). Dades recollides per les xarxes de control de la Direcció General de Recursos Hídrics del Govern Balear. (a): Dades hidroquímiques dels pous Caragolí 4 i 9 i piezòmetre de control del pou Caragolí 4. (b): Dades hidroquímiques dels pous Caragolí 5 i 6 i piezòmetre de control del pou Caragolí 5. (c): Dades hidroquímiques dels pous Caragolí 7 i 8 i piezòmetre de control del pou Caragolí 8. (pàgina següent).

Fig. 4. *Relationship between evolution of chloride concentrations (1999 to 2010) and hydraulic levels (1997 to 2009). Data collected by the control networks of the Direcció General de Recursos Hídrics of the Govern Balear. (a): Hydrochemical data from wells Caragolí 4 and 9 and control piezometer of well Caragolí 4. (b) Hydrochemical data from wells Caragolí 5 and 6 and control piezometer of well Caragolí 5. (c) Hydrochemical data from wells Caragolí 7 and 8 and control piezometer of well Caragolí 8. (next page).*


(a)
Cl (mg/L)
Nivell hidràulic (m.s.n.m)
Caragolí 4 (Cl)
Caragolí 9 (Cl)
Caragolí 4 (NH)
(b)
Caragolí 5 (Cl)
Caragolí 6 (Cl)
Caragolí 5 (NH)
(c)
Caragolí 7 (Cl)
Caragolí 8 (Cl)
Caragolí 8 (NH)

resistivitat. Per una banda s'han detectat elevats valors que s'han associat a carstificacions amb absència d'aigua i material detrític als porus i per l'altra, s'observen baixos valors de resistivitat assolits per l'efecte de calcarenites lleugerament alterades i amb indicis d'una possible salinització. En el perfil A, es poden diferenciar tres nivells geoelèctrics principals (Fig. 5). En el conjunt més superficial (M_1), les baixes resistivitats d'aquest nivell s'atribueixen a valors propis d'argiles edàfiques o de descalcificació, que resulten de la meteorització dels trams més superficials, i que omplen els porus de les calcarenites lleugerament carstificades, tal i com s'ha pogut constatar als sondejos adjacents als pous Caragolí 5, 6 i 7. El segon nivell (M_2) presenta una considerable continuïtat que es veu truncada a la posició 375 m. Aquest nivell es relaciona amb la mateixa calcarenita del nivell superior, però sense carstificació, excepte en un conjunt de zones anòmales amb elevats valors de resistivitat de entre 2.500 i 5.000 Ωm interpretades com a cavitats amb absència d'argila de descalcificació, on el buit confereix elevats valors de resistivitat. Com a l'anterior, aquesta capa geoelèctrica no es troba saturada. Al tercer nivell (M_3),

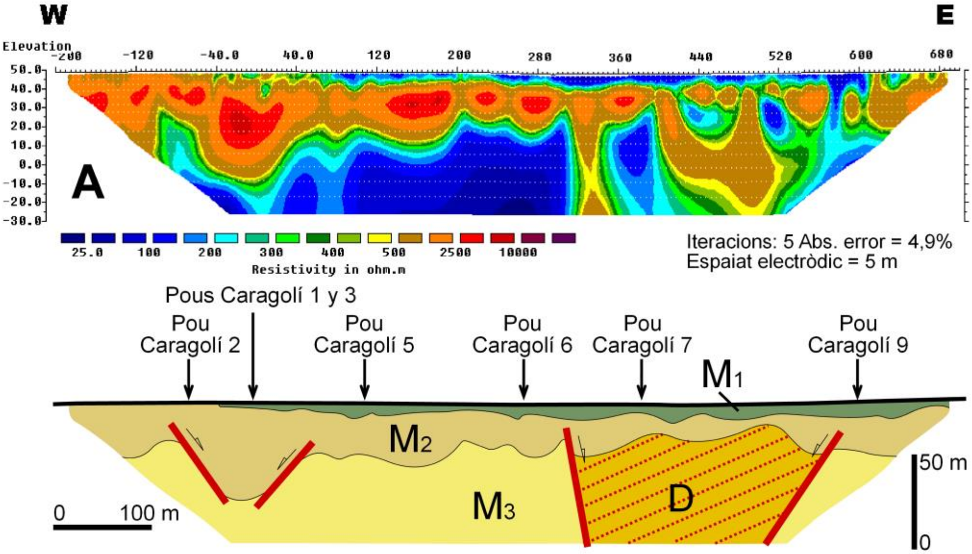


Fig. 5. Perfil de Tomografia Elèctrica A i interpretació del mateix. Perfil realitzat al llarg del camí que comunica els pous de bombament per abastament urbà Caragolí 1, 2, 3, 4, 5, 6, ,7 i 9. M_1: Calcarenites del Miocè superior carstificades amb argiles de descalcificació i edàfiques. M_2: Calcarenites del Miocè superior carstificades sense aigua ni argila. M_3: Calcarenites del Miocè superior carstificades i saturades amb una lleugera salinització. D: Dolina d'esfrondament.

Fig. 5. *Electrical Resistivity Tomography profile A and its interpretation. Profile carried out along the path connecting the urban water supply wells Caragolí 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 and 9. M_1: Late Miocene karstification calcarenites with decalcification and edaphic clays. M_2: Late Miocene karstification calcarenites without water or clay. M_3: Late Miocene karstification calcarenites saturated with light salinity. D:colapse doline.*

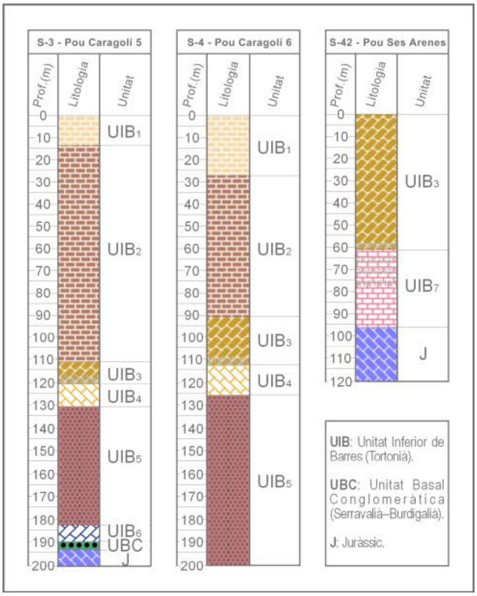


Fig. 6. Columnes procedents dels tres sondatges de reconeixement més representatius de la zona d'estudi. UIB_1: Calcarenites blanques molt poroses i carstificades amb argiles de descalcificació i edàfiques (corresponent als nivells geoelèctrics M_1 i M_2). UIB_2: Calcarenites ocres lleugerament carstificades sense argila i alterades (corresponent als nivells geoelèctrics M_2 i M_3). UIB_3: Dolomies ocres inalterades, no carstificades i amb còdols subangulosos a la base (corresponent al nivell geoelèctric M_4). UIB_4: Dolomies ocres amb tonalitats vermelloses. UIB_5: Gresos, arenes i argiles vermelles amb nivells microconglomeràtics. UIB_6: Dolomies blanques poc poroses i amb abundants restes fòssils. UIB_7: Calcàries rosades amb trams dolomititzats, crostes ferruginoses i còdols subangulosos. UBC: Conglomerats constituïts per còdols del Mesozoic en una matriu vermella. J: Dolomies grises molt compactes.

Fig. 6. *Borehole logs from the three most representative wells of the study area. UIB_1: White and very porous karstificated calcarenites with decalcification and edaphic clays* (corresponding to geoelectrical levels M_1 and M_2). *UIB_2: Yellow ochre and slightly karstificated without clay alterated calcarenites* (corresponding to geoelectrical levels M_2 and M_3). *UIB_3: Yellow ochre unaltered and no karstificated dolomites with subangular cobbles at the bottom* (corresponding to geoelectrical level M_4). *UIB_4: Red ochre dolomites. UIB_5: Red sandstones, sands and clays with microconglomerate levels. UIB_6: White and slightly porous dolomites with abundant fossils traces. UIB_7: Rose pink limestones with dolomite sections, ferruginous crusts and subangular cobbles. UBC: Conglomerates composed of Mesozoic cobbles in a red matrix. J: Grey and very compacted dolomites.*

parcialment saturat, la disminució de resistivitat en profunditat s'associa a la presència d'aigua i especialment a un augment de l'alteració de la calcarenita. Tot i així, la ràpida disminució de resistivitat no pot ser atribuïble únicament a aquest fet sinó que cal considerar altres factors. Per aquest motiu, s'associen els baixos valors de resistivitat a una lleugera salinització a partir d'una profunditat de 50 m (0 m s.n.m.) que seria més evident en les posicions on es situen els pous Caragolí 5 i especialment Caragolí 6. Aquest nivell geoelèctric també presenta una marcada discontinuïtat a partir de la posició 330 m.

La presència de morfologies càrstiques i de diferents graus d'alteració ha estat corroborada mitjançant la testificació dels sondatges perforats per a la instal·lació dels piezòmetres de control. La Fig. 6 mostra la representació gràfica de 3 dels 11 sondatges seleccionats per a aquest treball. Els 3 sondatges es caracteritzen per mostrar una alta variabilitat textural i s'han prioritzat respecte de la resta, per ser els que arriben a aparèixer a una major fondària de reconeixement en els cas dels S-3 i S-4 (corresponents als sondatges adjacents als pous Caragolí 5 i 6) i per l'interès del S-42, localitzat junt al pou de Ses Arenes, per a la comprensió de l'estudi. Les columnes mostren que les calcarenites del nivell

geoelèctric M_3, es mostren considerablement alterades i amb un grau d'alteració que es va fent més notori en profunditat. Aquests materials es situen a una profunditat màxima de 110 m, fora de l'abast del mètode de prospecció geofísica. A partir d'aquesta profunditat, s'han detectat materials dolomititzats caracteritzats per presentar abundants còdols subangulosos de color gris fosc a la seva base i especialment per trobar-se poc alterats i més compactes que les calcarenites situades per sobre. S'ha comprovat que els pous Caragolí 4 i 9 bomben des d'aquests materials, el que permet relacionar el seu relatiu bon estat hidroquímic (si es compara amb altres pous de la zona) amb la litologia des de la que s'efectua el bombament.

Tal i com s'ha pogut constatar mitjançant la testificació del sondeig S-42, aquests mateixos materials afloren en torn al pou de bombament de Ses Arenes. Així, al perfil B (Fig. 7) s'ha reconegut aquesta unitat (nivell geoelèctric M_4) amb resistivitats molt superiors a les calcarenites identificades al perfil A (nivells geoelèctrics M_1, M_2 i M_3), com a conseqüència de l'alta compacitat que presenten les dolomies. La permeabilitat d'aquests materials cal associar-la a fractures, detectades per disminucions abruptes de resistivitat. D'aquesta manera, al perfil B, les dolomies es mostren considerablement fracturades tal i com s'observa a la part central, entre les posicions -50 i 0 m, on una anomalia en un interval de resistivitats de entre 300 i 400

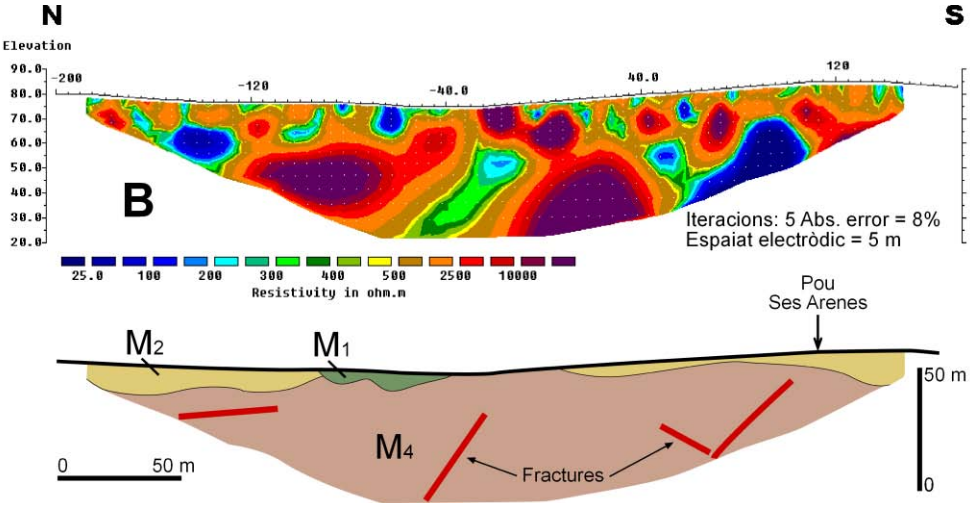


Fig. 7. Perfil de Tomografia Elèctrica B i interpretació del mateix. Perfil realitzat en el camí d'accés al pou de Ses Arenes. M_1: Calcarenites del Miocè superior carstificades amb argiles de descalcificació i edàfiques. M_2: Calcarenites del Miocè superior carstificades sense presència d'aigua ni argila. M_4: Dolomies fracturades del Miocè superior sense carstificació.

Fig. 7. *Electrical Resistivity Tomography profile B and its interpretation. Profile carried out along the path to the well Ses Arenes. M_1: Late Miocene karstification calcarenites with decalcification and edaphic clays. M_2: Late Miocene karstification calcarenites without water or clay. M4: Late Miocene fractured dolomites without karstification.*

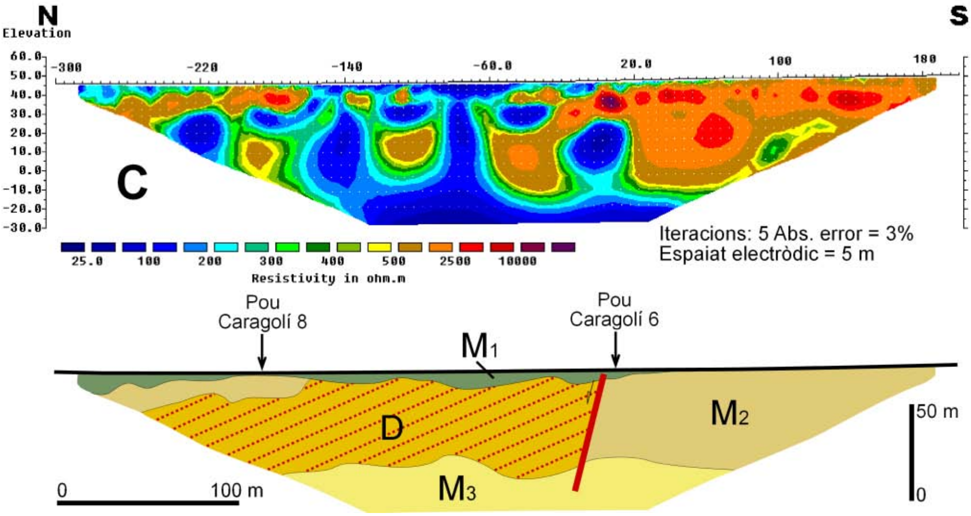


Fig. 8. Perfil de Tomografia Elèctrica C i interpretació del mateix. Perfil realitzat perpendicularment al perfil A, davant els pous Caragolí 6 i 8. M_1: Calcarenites del Miocè superior carstificades amb argiles de descalcificació i edàfiques. M_2: Calcarenites del Miocè superior carstificades sense presència d'aigua ni argila. M_3: Calcarenites del Miocè superior carstificades i saturades amb una lleugera salinització. D: Dolina de col·lapse.

Fig. 8. *Electrical Resistivity Tomography profile C and its interpretation. Profile carried out perpendicularly to profile A in front of wells Caragolí 6 and 8. M_1: Late Miocene karstification calcarenites with decalcification and edaphic clays. M_2: Late Miocene karstification calcarenites without water or clay. M_3: Late Miocene karstification calcarenites saturated with light salinity. D: Colapse doline.*

Ωm és atribuïda a una zona de fractura. De la mateixa manera, també s'associen les anomalies de baixa resistivitat amb fractures a les posicions situades entre -150 i -120 m i 40 i 110 m amb valors de resistivitat inferiors als 10 Ωm. El pou Ses Arenes presenta un relatiu bon estat hidroquímic, similar al dels pous Caragolí 4 i 9, en els quals s'ha deduït que el bombament es produeix des d'aquesta litologia.

Les discontinuïtats horitzontals detectades als nivells M_2 i M_3 del perfil A i que també es poden observar en els nivells geoelèctrics del perfil C (Fig. 8), han estat interpretades com la conseqüència d'una paleodolina d'esfondrament (D) ubicada entre les posicions 375 i 575 m al perfil A i entre -300 i 20 m al perfil C. En aquest darrer perfil, des de la posició 20 m fins a la 200 m es pot considerar la mateixa disposició general que s'ha observat en la major part del traçat del perfil A. Domina la imatge una calcarenita, amb valors de resistivitat en un interval de entre 500 i 2.500 Ωm, no saturada i carstificada irregularment amb presència o absència d'argila segons el cas (M_1 i M_2). En profunditat, una ràpida reducció de resistivitat, s'atribueix a un augment del grau d'alteració de la roca combinada amb una lleugera salinització de l'aqüífer (M_3). En canvi entre -300 i 20 m els nivells de resistivitat no segueixen cap ordre, mostrant

una disposició caòtica que podria correspondre a una alternança de blocs calcarenítics, cavitats (algunes d'elles amb argiles de descalcificació) i fractures on trobem els valors de resistivitat més baixos. Al perfil A també es detectaria aquesta disposició amb els trets propis d'una zona d'esfondrament. Aquesta paleodolina afectaria els pous Caragolí 7 i 8 actualment en desús per les elevades concentracions de clorurs que presenten en el cas de ser utilitzats per abastament. Així, pot relacionar-se la elevada taxa de clorurs que presenten els pous, amb aquesta estructura geomorfològica, on les fractures actuarien com a vies preferents de la intrusió marina en cas de bombament. D'una manera similar, al voltant dels pous de bombament Caragolí 1 i 3, afectats també per elevades concentracions de clorurs quan s'utilitzen, l'elevat gruix del nivell M_2 podria indicar la presència d'una altra cavitat de dimensions majors a la resta de carstificacions detectades, i que en aquest cas podria afectar aquests pous d'una manera semblant als Caragolí 7 i 8.

Conclusions

En el sector occidental de la U. H. Migjorn es produeix un fenomen generalitzat d'intrusió marina. Els nivells de salinització de l'aqüífer depenen, lògicament, dels cabals d'extracció però també de les permeabilitats derivades de les característiques geològiques del subsòl. Així, s'ha constatat que el procés s'accentua quan es produeix un bombament des de la litologia reconeguda mitjançant la prospecció geofísica com a unitat geoelèctrica M_3. La intrusió marina incrementarà la seva repercussió en el cas d'existir algun tipus d'estructura càrstica d'esfondrament, ja que aquesta actuarà com a una via preferent de circulació de l'aigua. A les litologies situades per sota la unitat M_3, en mostrar-se més consolidades, no es detecta un procés d'intrusió de tanta intensitat, el que explicaria el relatiu bon estat hidroquímic dels pous Caragolí 4, 9 i Ses Arenes. Cal tenir en compte que tot i la tendència positiva del nivell hidràulic a la zona durant els últims 10 anys, relacionada amb l'entrada en funcionament dels pous de Ses Arenes, els bombaments intensius dels pous més interiors segueixen contribuint a la salinització de l'aqüífer. Aquest fet es podria arribar atribuir especialment al intens bombament del pou Caragolí 9 que estaria contribuint a l'avançament de la falca marina terra endins i per tant afectaria la resta de pous de la zona, tot i la tendència positiva en la recuperació del nivell piezomètric.

El mètode de Tomografia Elèctrica s'ha mostrat molt efectiu per a la detecció de zones anòmales relacionades amb carstificacions i estructures d'esfondrament per una banda i la presència d'una interfase marina per una altra. Així, les elevades concentracions de clorurs manifestades per una baixa resistivitat, contrasten significativament amb elevats valors provocats per les cavitats en el cas de detectar carstificacions no saturades ni reomplertes per argiles. De la mateixa manera, la Tomografia Elèctrica ha permès determinar la disposició del subsòl de la zona d'estudi, mostrant a la vegada desordres de resistivitats propis de zones d'enfonsaments i reconèixer la posició i evolució del fenomen de la salinització. Finalment, cal destacar la idoneïtat de la integració dels mètodes hidroquímics i geofísics recolzats per la testificació de sondejos. Aquesta combinació de tècniques permeten realitzar una correcta diagnosi de la problemàtica que representa la intrusió marina en els aqüífers litorals, en aquest

cas, les noves dades milloren el coneixement d'aquesta problemàtica i poden contribuir a una gestió més fonamentada de l'aqüífer de Migjorn de Menorca en la seva part occidental.

Agraïments

Aquest estudi ha estat finançat pel Servei d'Estudis i Planificació de la Direcció General de Recursos Hídrics de la Conselleria de Medi Ambient del Govern Balear. S'agraeix l'oportunitat donada per aquest servei per a realitzar el present projecte i en especial a Alfredo Barón i Jordi Giménez. També s'agraeix les facilitats donades per l'Àrea d'Aigua i Serveis de l'Ajuntament de Ciutadella, en concret a Joan Moll així com també als tècnics municipals d'aquest servei. A Joana Català per la col·laboració en l'accés als testimonis emmagatzemats a la Fortalesa de La Mola, als tècnics de l'OBSAM pel mateix motiu i per facilitar la base cartogràfica utilitzada en aquest treball i al Dr. Antoni Obrador per les seves indicacions en la planificació inicial de l'estudi.

Bibliografia

Barón, A., Fayas, J.A. i González, C. 1984. Proceso de salinización de las aguas subterráneas en el llano de Palma. *I Congreso Español de Geología*. Segovia.

Barón, A. i González, C. 1978. *Estudio de la salinidad en la zona de Pont d'Inca.* Informe intern. Servicio Hidráulico de Baleares. Inèdit.

Boletín Oficial del Estado (BOE). 2003. *Real decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano*. Ministerio de Sanidad y Consumo. Madrid.

Custodio, E., Barón, A., Rodríguez Morillo, H., Poncela, R. i Bayó, A. 1992. *Saline water in S'Albufera Natural Park aquifer system, Mallorca Island (Spain): a preliminary study.* Barcelona Proceedings 12th saltwater intrusión meeting. CIHS. 661-686.

deGroot-Hedlin, C. i Constable, S. 1990. Occam's inversion to generate smooth, two dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics,* 55: 1613-1624.

Direcció General de Recursos Hídrics (DGRH). 1998. *Proposta del Pla Hidrològic de la demarcació hidrogràfica de les Illes Balears.* Conselleria de Medi Ambient. Govern de les Illes Balears. Palma de Mallorca.

Direcció General de Recursos Hídrics (DGRH). 2011. *Esborrany del Pla Hidrològic de les Illes Balears.* Conselleria de Medi Ambient i Mobilitat. Govern de les Illes Balears. Palma de Mallorca.

Dirección General de Obras Hidráulicas (DGOH). 1989. *Delimitación de las unidades hidrogeológicas del territorio peninsular e Islas Baleares y síntesis de sus características.* Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid.

Giménez, J., Gelabert, B. i Barón, A. 2004. Hidrologia Subterrània del Migjorn. *In*: Fornós, J.J., Obrador, A. i Rosselló, V.M. (eds.). *Història Natural del Migjorn de Menorca. El medi físic i l'influx humà.* Mon. Soc. Hist. Nat. Balears. Palma de Mallorca. 121-128.

Griffith, D.H., Turnbull, J. i Olayinka, A.I. 1990. Two-dimensional resistivity mapping with a computer controlled array. *First Break,* 8: 121-129.

Instituto Geológico y Minero de España (IGME) i Direcció General de Recursos Hídrics (DGRH). 2001. *El estado de las aguas subterráneas en el archipiélago balear. Isla de Menorca – Años 2000-2001*. Ministerio de Educación y Ciencia. Madrid.

Instituto Geológico y Minero de España (IGME) i Direcció General de Recursos Hídrics (DGRH). 2004. *El estado de las aguas subterráneas en el archipiélago balear. Isla de Menorca – Año 2004*. Ministerio de Educación y Ciencia. Madrid.

Instituto Geológico y Minero de España (IGME) i Direcció General de Recursos Hídrics (DGRH). 2006. *El estado de las aguas subterráneas en el archipiélago balear. Isla de Menorca – Años 2005-2006*. Ministerio de Educación y Ciencia. Madrid.

Kruse, E. i Mas-Pla, J. 2009. Procesos hidrogeológicos y calidad del agua en acuíferos litorales. *In*: Mas-Pla J. i Zuppi, G. (eds.). *Gestión ambiental integrada de áreas costeras*. Rubes Editorial. Barcelona. 29-53.

López, J.M. i Mateos, R.M. 2006. Control estructural de las anomalías geotérmicas y la intrusión marina en la Plataforma de Llucmajor y la Cubeta de Campos (Mallorca). *Las Aguas Subterráneas en los Países Mediterráneos. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas*, 17: 607-613.

López-García, J.M. i Mateos, R.M. 2003a. La intrusión marina en los acuíferos costeros de la Isla de Mallorca. *Tecnología de la Intrusión de Agua de Mar en Acuíferos Costeros: Países Mediterráneos. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas*, 8: 383-392.

López-García, J.M. i Mateos, R.M. 2003b. La intrusión marina en los acuíferos de la Isla de Menorca. *Tecnología de la Intrusión de Agua de Mar en Acuíferos Costeros: Países Mediterráneos. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas*, 8: 393-399.

Loke, M.H. i Barker, R.D. 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosection by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting,* 44: 131-152.

Loke, M.H., Acworth, I. i Dahlin, T. 2003. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Exploration Geophysics*, 34(3): 182-187.

Mas-Pla, J., Rodríguez-Florit, A., Zamorano, M., Roqué, C., Menció, A. i Brusi, D. 2012. Anticipating the effects of groundwater withdrawal on seawater intrusion and soil settlement in urban coastal areas. *Hydrological processes,* DOI: 10.1002/hyp. 9377.

Mateos, R.M. i López, J.M. 2003. Retroceso de la Intrusión marina debido a la sustitución de aguas subterráneas por aguas residuales tratadas para el regadío de una zona agrícola. El Pla de Sant Jordi (Mallorca). *Tecnología de la Intrusión de Agua de Mar en Acuíferos Costeros: Países Mediterráneos. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas*, 8: 651-658.

Mateos, R.M., López, J.M., Gelabert, B., Marcuello, A., Ledó, J.J., Queralt, P., Murillo, J.M., De la Orden, J. i Ortiz, G. 2007. Control geológico de la intrusión marina en los acuíferos que abastecen a la Bahía de Alcudia, Norte de la Isla de Mallorca**.** *In:* Pulido Bosch, A., López-Geta, J.A. i Ramos, G. (eds.). *Los acuíferos costeros: retos y soluciones. Coastal aquifers: challenges and solutions.* Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. 155-162.

Obrador, A. 1970. *Estudio estratigráfico y sedimentológico de los materiales miocénicos de la Isla de Menorca.* Tesi doctoral. Universitat de Barcelona. Inèdita.

Obrador, A., Pomar, L., Rodríguez, A. i Jurado, M.J. 1983. Unidades deposicionales del Neógeno menorquín. *Acta Geológica Hispánica,* 18: 87-97.

Obrador, A. i Pomar, L. 2004. El Miocè del Migjorn. *In*: Fornós, J.J., Obrador, A. i Rosselló, V.M. (eds.). *Història Natural del Migjorn de Menorca. El medi físic i l'influx humà.* Mon. Soc. Hist. Nat. Balears. Palma de Mallorca. 73-92.

Pomar, L., Obrador, A. i Westphal, H. 2002. Sub-wavebase cross-bedded grainstones on a distally steepened carbonate ramp, Upper Miocene, Menorca, Spain. *Sedimentology,* 49: 139-169.

Rosell, J. i Llompart, C. 1983. Aportaciones al estudio del Mioceno del extremo oriental de Menorca. *Acta Geológica. Hispánica*, 18(2): 99-104.

Rosell, J. i Llompart, C. 2002. *El naixement d'una illa. Menorca. Guia de geologia pràctica*. Impressió i relligat Dacs, Indústria Gràfica, S.A. Moncada i Reixac. 279 pp.

Sasaki, Y. 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting,* 40: 453-463.